

Preliminary Research on Low-Power Laser Wireless Energy Transmission

Wei Yang¹, Changjun Liu¹, Xin Wu¹, Xinbin Hou²

¹School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu

²Qian Xuesen Key Laboratory, China Academy of Space Technology, Beijing

Email: cjliu@scu.edu.cn

Received: Jan. 13th, 2013; revised: Jan. 28th, 2013; accepted: Feb. 4th, 2013

Abstract: In the paper, a kind of distributed laser-powered system is constructed. The system can transmit power with laser beam directed to the photovoltaic cells by the beam-steering lens from the semiconductor laser. At the distance of 10 m between the emitter and receiver, the light-electricity transmission efficiency is studied by experiments with this system in the different situations, using single wavelength or different wavelength laser of three kinds to transmit power, and a preliminary exploration is implemented for the wireless energy transmission at the distance of 150 m. At the same time, the design of the system and the energy consumption are analyzed.

Keywords: Laser; Laser-Powered System; Transmission Efficiency

低功率激光无线能量传输的初步研究

杨 伟¹, 刘长军¹, 吴 昕¹, 侯欣宾²

¹四川大学电子信息学院, 成都

²中国空间技术研究院钱学森重点实验室, 北京

Email: cjliu@scu.edu.cn

收稿日期: 2013 年 1 月 13 日; 修回日期: 2013 年 1 月 28 日; 录用日期: 2013 年 2 月 4 日

摘 要: 本文构建了一种分布式激光输能系统, 该系统采用半导体激光器发射激光, 经透镜调节后, 照射到远处的太阳能电池上转换为直流电能。利用该系统, 实验研究了在发射端与接收端距离 10 m 的情况下, 三种波长的激光单独输能及相同和不同波长激光混合输能时的系统的光电能量转换效率, 并对 150 m 输能距离的激光输能进行了初步实验探索。同时本文研究分析了该系统的设计和激光在传输过程中的功率损耗等问题。

关键词: 激光; 激光输能系统; 传输效率

1. 引言

近年来, 随着世界能源危机问题的日益严峻, 空间太阳能电站(SPS, Solar Power Satellite)的研究越来越受到人们的关注。空间太阳能电站的方案是将 SPS 设备运送到空间, 例如地球同步轨道, 然后把收集来的太阳能以微波或激光的方式输送回地面。

激光无线能量传输具有定向性好, 能量密度大等优点, 但是也有转换效率低、天气影响大、功率容量

有限等缺点。随着相关科学研究的发展, 激光无线能量传输的设计方案和输电水平正在逐渐发展与提高。例如, 激光无线能量传输技术在无人机能量补充等系统中的应用方案已经逐渐趋于成熟。Laser Motive 公司在 2009 年美国宇航局太空电梯竞赛中, 使用激光对机械攀爬装置实行无线输能, 刷新了激光无线输能的一系列新纪录, 为无人机激光无线输能方案奠定了良好基础, 并充分验证了广泛运用激光实现无线输能

的可能性^[1]。因此，在国内对激光用于无线能量传输的研究相对较少的背景下，我国迫切需要激光无线能量传输技术的相关研究。

本文构建了一种分布式激光输能系统，该系统利用直流电源激励激光器，发射激光经透镜调节后，照射到远处的太阳能电池上转换为直流电能。实验研究了发射端与接收端距离 10 m 的情况下，单种激光源输能及多种激光混合输能时的能量转换效率和功率损耗，并对利用激光在 150 m 的距离无线输能进行了初步实验探索。

2. 激光无线能量传输系统设计与分析

2.1. 激光无线能量传输系统组成

分布式激光输能系统由直流电源、半导体激光器(自带可调焦的光学透镜镜头)，多晶硅太阳能电池及相应的测量电路组成，系统如图 1 所示。

2.2. 系统各部件的设计与系统中能量在传输过程的传输效率分析

2.2.1. 激光器

激光器是利用受激辐射原理使光在某些受激发的物质中放大或振荡发射的器件。一般采用的激光器根据工作物质物态的不同可以分为气体激光器，固体激光器和半导体激光器。其中半导体激光器的电光转换效率较高，且造价相对低廉，故采用半导体激光器(输出激光波长为 660 nm 的红光半导体激光器，输出激光波长为 532 nm 的绿光半导体激光器与输出激光波长为 445 nm 的蓝紫光半导体激光器)进行能量传输实验。

2.2.2. 光学透镜

通过调节透镜镜头，调节照在太阳能电池上激光光斑的大小与位置，使激光光斑聚在太阳能电池上，

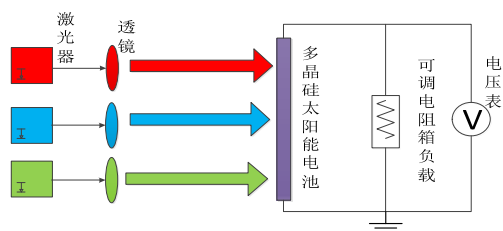


Figure 1. Distributed system on energy transmission with laser
图 1. 分布式激光输能系统

并使光斑大小与太阳能电池大小吻合。由于本实验中激光的横向光场振幅分布是高斯分布，故又称为高斯光束。高斯光束中心点光强最大，光束的光强沿光束中心点向外逐渐降低。高斯光束光强下降到最大光强的 $1/e^2$ 倍处即是它的光斑的大小，所以高斯光束光斑范围的功率小于光束的总功率，导致激光经过透镜入射到太阳能电池上时会产生功率损耗^[2]。该损耗大小可由光功率耦合率来计算，对于远场分布呈椭圆分布的高斯光束，设定其发散比(即长轴与短轴之比)为 k ，经过半径为 ρ (通常我们取 $\rho = k$)的光阑(即透镜)后，光功率的耦合效率：

$$C_E = 1 - \frac{2\pi}{k} \int_0^{\pi/2} \frac{[1 - \exp(-2\rho^2 f_\theta)]}{f_\theta} d\theta \quad (1)$$

$$f_\theta = \cos^2 \theta + \frac{\sin^2 \theta}{k}$$

经过透镜衰减后的功率：

$$P_s = P_{in} \cdot C_E \quad (2)$$

其中 P_s 为太阳能电池接收到的激光功率， P_{in} 为入射透镜的激光功率。上式可知发散比 k 越小，激光通过透镜时损失的功率越小，据本实验激光光束远场分布， k 约为 1， C_E 约为 86.5%。

2.2.3. 激光在空气中传输

激光在空气中传播时，由于大气中存在着各种气体分子和微粒，部分光辐射能量被吸收而转变为其他形式的能量(如热能等)，部分能量被散射而偏离原来的传播方向，导致传输激光辐射强度衰减。在均匀大气中，波长为 λ 的激光传输衰减满足布格尔-朗伯定律：

$$\tau(\lambda, L) = \frac{P(\lambda, L)}{P(\lambda, 0)} = e^{-\gamma(\lambda)L} \quad (3)$$

其中 L 为激光在大气中的传输距离； $P(\lambda, 0)$ 为通过大气前的激光功率， $P(\lambda, L)$ 为通过 L 距离大气后的激光功率； $\gamma(\lambda)$ 为激光的衰减系数； $\tau(\lambda, L)$ 为激光在大气中传输 L 距离的透过率。

据文献研究^[3]，在进行实验的大气环境中，10 m 输能距离下，激光在空气传输过程中功率损耗约为 5%左右；150 m 输能距离下，激光在空气传输过程中功率损耗增高至 50%左右。

2.2.4. 太阳能电池

本系统中采用多晶硅太阳能电池接收激光光束。目前，市场上大部分的多晶硅太阳能电池的光电能量转换效率较低。据研究，多晶硅太阳能电池在光电能量转换中的能量损失主要来源于以下三方面：1) 光在电池表面的反射；2) 进光面电极材料的覆盖面积为入射光能量带来的损失；3) 由于电池厚度薄而导致的透射损失^[4]。

对于不同波长的单色光，即使辐照度相同，太阳能电池单位面积产生的光电流密度也不同。这种太阳能电池的短路电流与入射光波长相关的特性称为太阳能电池光谱响应。光谱响应表明了太阳能电池对不同波长光的吸收^[5,6]。本系统中采用多晶硅太阳能电池的光谱响应曲线图 2 所示

由图可知，在激光入射情况下，根据太阳能电池对不同波长光的光谱响应，电池的光电转换效率会随激光波长变化而变化。入射光的波长越接近光谱响应曲线峰值处的波长，电池的光电能量转换效率越高。太阳光包含了不同波长的可见光以及不可见光，且电池对太阳光的吸收具有选择性，所以理论上，采用波长在光谱响应曲线峰值处波长附近一定区域内的激光照射电池，电池的光电能量转换效率比相同功率的太阳光入射情况下要高。

3. 激光无线能量传输系统实验测量

使用安泰信 APS3003S 直流电源为激光器供电，利用中科院 LPE-1C 激光功率计标定激光器的输出功率，Fluke DT890C 电压表测量可调电阻箱(0~9000 Ω)上的电压。采用自带可调焦透镜的 9 个半导体激光器：红光、绿光、蓝紫光各 3 支，分别编号为红(A、B、C)，绿(A、B、C)，蓝紫(A、B、C)。采用 135 mm × 135

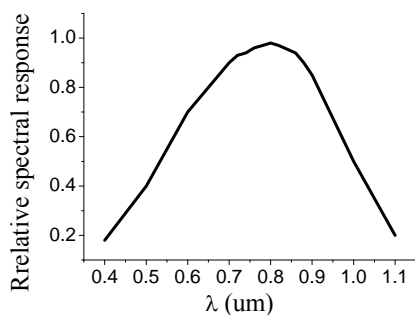


Figure 2. Spectral response curve of silicon solar cell
图 2. 硅太阳能电池光谱响应曲线

mm × 3.2 mm 规格大小的多晶硅太阳能电池作为接收装置。

3.1. 10 m 输能距离的实验

激光无线能量传输系统实验测量步骤：用激光功率计标定各个激光器输出功率，实验中激光器与太阳能电池距离为 10 m，调节各激光器的可调焦镜头，使每个激光器输出的光斑皆与太阳能电池大小吻合。采用挡板挡住激光束的方法，依次测量红激光器 A、B、C 单独和同时输能时，太阳能电池的输出功率。

然后使用 3 个绿光激光器和 3 个蓝紫光激光器，重复上述测量。最后，选取红、绿、蓝紫激光器各一支，利用红绿蓝三种激光模拟太阳光，再次进行上述测量。

经实际测得实验结果如下：图 3(a)-(c)分别为采用 3 个红色、绿色、蓝紫色激光器输能时，负载电阻 - 太阳能电池输出功率的曲线图；图 3(d)为用红绿蓝三种激光模拟太阳光输能时，负载电阻 - 太阳能电池输出功率的曲线图。激光器输出功率如表 1 所示；不同输能情况下，太阳能电池输出的最大功率如表 2 所示；由于，系统的最大能量转换效率 = 太阳能电池输出的最大功率/激光器输出总功率，得到不同输能情况下，系统的最大能量转换效率如表 3 所示。

3.2. 150 m 输能距离的实验

在 150 m 的距离下，采用相同实验方法，测量红激光器 A 单独输能时太阳能电池输出功率，得到电池输出的最大功率为 3.6 mW，系统最大能量转换效率约为 1.50%。

4. 结语

根据实验结果图 3 和表 3，10 m 输能距离下，使用 3 个激光源，采用功率合成的方法进行输能时，输送的最大能量比 3 个激光源分别独自输能时输送的最大能量之和更高，效率也更高。在激光输能中，多个较低功率激光源相对单个较高功率激光源成本更加低廉，输能的稳定性，持续性更好，证明了分布式激光输能系统具有良好的前景。

由表 3 得，在 10 m 输能距离的实验中，采用模拟的太阳光输能时得到的最大能量转换效率为 4.65%，采用红光输能时得到的最大能量转换效率为

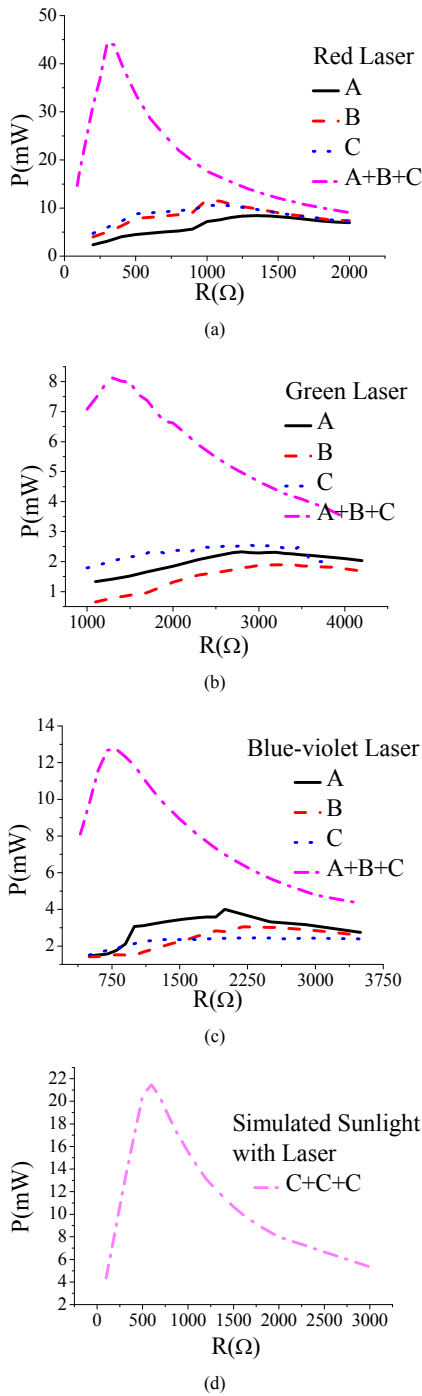


Figure 3. Load resistance-solar cell output power curves
图 3. 负载电阻 - 太阳能电池输出功率的曲线图

Table 1. Output power of laser diodes (unit: mW)
表 1. 激光器输出功率 (单位: mW)

编号	A	B	C
红	239.0	255.0	244.0
绿	106.0	81.6	123.4
蓝紫	157.5	109.6	124.0

Table 2. In different ways of transmitting energy, the max output power of cell (unit: mW)
表 2. 不同输能情况下, 太阳能电池输出的最大功率 (单位: mW)

编号	A	B	C	A+B+C	C+C+C
红	8.43	11.76	10.63	44.40	
绿	2.32	1.90	2.55	8.02	21.48
蓝紫	3.58	2.46	3.05	12.72	

Table 3. With Table 1 and 2, in different ways of transmitting energy, the max power conversion efficiency of the system
表 3. 据表 1 和表 2, 不同输能情况, 系统的最大能量转换效率

编号	A	B	C	A+B+C	C+C+C
红	3.52%	4.61%	4.35%	6.02%	
绿	2.19%	2.32%	2.10%	2.60%	4.65%
蓝紫	2.20%	2.24%	2.46%	3.25%	

6.02%。太阳能电池接收红色激光时, 能量转换效率高于模拟太阳光。由表 2 得, 10 m 距离下采用红光输能时, 太阳能电池的最大输出功率为 44.40 mW, 获得了 6.02% 的传输效率, 故利用激光无线能量传输技术, 也可以在工程上为一定距离下低功率设备进行能量补充。通过理论推导和实验验证, 可以推断出, 在可见光波段实验激光输能, 采用技术更成熟, 成本更低廉的红光激光器输能更值得研究。

由于激光的方向性好, 光束扩散小, 所以采用激光进行无线能量传输的输能系统具有发射面积和接收面积小的优点, 对远距离的无线能量传输具有重要意义。在 150 m 的距离, 实验红激光器 A 单独输能时, 得到系统最大能量转换效率约为 1.50%。对比 10 m 输能距离的实验, 150 m 输能距离的实验中输能效率明显大幅下降。理论推导和实验验证表明, 激光在空气中的指数衰减特性限制了远距离激光输能的发展。

在实验过程中, 能量损失的一个主要原因是太阳能电池的光电能量转换效率较低, 并且常规的太阳能电池在一定高强度的激光照射下会损害电池。然而, 随着制造用于激光输能的光电池技术的不断发展, 激光输能系统的输能效率和系统的功率容量可以得到提高。

5. 致谢

本文得到民用航天预研项目和 863 项目(2012AA120605)资助。

参考文献 (References)

- [1] T. J. Nugent, J. T. Kare. Laser motive white paper-power beaming for UAVs [URL], 2010.
<http://lasermotive.com/wp-content/uploads/2010/04/Wireless-Power-for-UAVs-March2010.pdf>
- [2] 姚宇鹤. 半导体激光器光束质量评估[D]. 西安电子科技大学, 2007.
- [3] 贾建周, 宋德安, 贾仁耀等. 激光大气传输衰减的估算方法[J]. 电子信息技术, 2010, 25(4): 73-76.
- [4] 艾德生, 高喆. 新能源材料: 基础与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [5] 朱永祥. 激光辐照对硅太阳能电池的作用[D]. 国防科学技术大学, 2003.
- [6] M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, et al. Solar cell efficiency tables (version 37). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2011, 19(1): 84-92.